Aus dem Institut für Physikalische Therapie und Röntgenologie
der Universität München (Vorstand: Prof. Dr. Gottfried Boehm)

Untersuchungen über die Gewebsdurchlässigkeit für rote und infrarote Strahlen

Inaugural-Dissertation

zur

Erlangung der Doktorwürde

in der

gesamten Medizin

verfaßt und einer

Hohen Medizinischen Fakultät

der

Bayerischen Ludwigs-Maximilians-Universität
zu München

vorgelegt von

Georg Hofmann
aus München

München 1939
Gedruckt bei Otto von Holten in Berlin

Gedruckt mit Genehmigung der Medizinischen Fakultät der
Bayerischen Ludwigs-Maximilians-Universität in München

Referent: Professor Dr. Gottfried Boehm

R. UNIV.
BIBLIOTHEEK
LEIDEN

Tag der mündlichen Prüfung:
23. Dezember 1937

Sonderabdruck
aus „Strahlentherapie" Band 65, Heft 3
(Verlag von Urban & Schwarzenberg, Berlin und Wien)

Unter den Behandlungsmethoden der Strahlenheilkunde findet auch die Bestrahlung mit Rot und Infrarot zur Beeinflussung verschiedenster Krankheitszustände Verwendung. Die therapeutischen Anwendungsmöglichkeiten sind nach den zahlreichen Autoren, die sich damit befassen, ebenso mannigfaltig wie die vielen Konstruktionen von Rot- und Infrarotstrahlern. Die Beurteilung der Wirksamkeit dieser Strahlenquellen bzw. ihrer Spektralgebiete im Rot und Infrarot (I.R.) ist sehr verschieden. So lehnen manche Autoren I.R. zur Bestrahlung vollkommen ab und schreiben alle Wirkung dem „kalten Rotlicht" (Neonlicht) zu. Andere wieder empfehlen auf Grund ihrer Erfahrungen Mischstrahlen oder reines I.R. zur Erzielung der gewünschten Heilerfolge. Immer werden die Vorschläge mit der physikalischen Eigenart der verwendeten Strahlung begründet und als Beweis für die Strahlendurchdringung eine Reihe im Schrifttum erschienener Arbeiten, besonders aber die Mesernitzkis (1929) und Healds (1933), herangezogen, die anscheinend als einzige die Durchdringungsfähigkeit von Rot und I.R. am Lebenden feststellten. Um klarere Vorstellungen über das spektrale Verhalten lebenden menschlichen Gewebes bei der Durchstrahlung und auch über die Größenordnung der Strahlendurchlässigkeit zu gewinnen, erschien die Notwendigkeit die sich zum Teil widersprechenden Angaben des Schrifttums zu sichten und durch eigene Untersuchungen zu ergänzen gegeben.

Es ist bekannt, daß für die Gewebsdurchdringung ein Teil der auftreffenden Strahlung schon an der Oberfläche der Haut infolge Reflexion verlorengeht. Im Gewebe ist der Einfluß der Streuung auf die Penetration wohl wesentlich größer, als vielfach angenommen wurde.

Reflexion, Streuung und schließlich die Absorption bedingen zusammen die Größe der gesamten Strahlenschwächung.

Für das Studium der Durchlässigkeitsverhältnisse im Gewebe und insbesondere im Hinblick auf die Auswertung der Versuchsergebnisse erscheint es angebracht, die genannten Einzelfaktoren der Strahlenschwächung einer gesonderten Betrachtung zu unterziehen, wenn auch praktisch vielfach nur die Gesamtstrahlenschwächung in Erscheinung tritt. Physikalisch-rechnerisch kommt sowohl der Streuung wie der Absorption ein getrennter Schwächungsfaktor zu ($e^{-f_S-f_A}$), praktisch kann der Ausdruck Absorption die Streuverluste mitumfassen, da ja auch das gestreute Licht im biologischen Objekt schließlich absorbiert wird.

Für die Reflexion an der Haut gelten die Gesetze der Reflexion rauher Oberflächen. Danach wird die einfallende Strahlung an und in den Hautleisten, den oberflächlichen Unebenheiten der Haut, durch Beugung und Brechung nach allen Richtungen hin gestreut. Es wird angenommen, daß in Richtung der einfallenden Strahlen mehr gestreut wird als entgegen dieser Richtung. Danach wäre also eindringendes Licht schon zum Teil Streulicht. Der Lichtbetrag aber, der nach außen zurückgeworfen wird, wächst mit dem Einfallswinkel. Dies bedingt eine Erhöhung des Gesamtreflexionsvermögens der rauhen Oberfläche. Bestätigt wurde die Abhängigkeit der Reflexion vom Einfallswinkel nach dem Lambertschen Kosinusgesetz ($E_i = E \cdot \cos i$) durch die Albedomessungen Wellensteins (1).

Die Reflexion roter und i.r. Strahlen an der Haut wird in einer Reihe eingehender Arbeiten untersucht. Kartschagin (2) ermittelte die Reflexion pigmentierter und nichtpigmentierter Haut. Normale, nichtpigmentierte Haut reflektiere im I.R. mit 62% und im Rot mit 38% der einfallenden Strahlen am meisten, wobei die durchdringende Strahlung gegen das Ultraviolett immer mehr zunehme. Das Hautpigment vermindere das Reflexionsvermögen für die gesamte Strahlung, besonders aber für Rot (nur mehr 20%) und I.R. (42% gegen 62%). Nach eigenem Verfahren untersuchte auch Yamada (3) die Reflexion menschlicher pigmentierter und nichtpigmentierter Haut im I.R. Nach seinen Versuchen reflektiert die menschliche Haut im I.R. im Mittel 55%, nach Anlegen einer Stauungsbinde am Unterarm durchschnittlich 41%. An behaarter Haut sinkt die Durchlässigkeit noch erheblich (10 bis 17%) (4, 5), was auf erhöhte Reflexion zurückzuführen sein dürfte. Besonders wertvoll sind die rein physikalischen Untersuchungen Wellensteins (s. 1). Sie ergeben durchaus ähnliche Resultate für das Reflexionsvermögen im Wellenbereich von $0{,}7 < \lambda \lesssim 1{,}2\ \mu$ bei $\lambda_{max.}$ 1,0 μ. Bei Versuchen

mit Vertretern verschiedener Rassen zeigt sich, daß mit Zunahme der Pigmentation die Reflexion abnimmt (Europäer 58%, Neger 40%). Nach zahlreichen Untersuchungen kommt Schultze (6) zu folgenden Feststellungen: Je lichtentwöhnter (weniger pigmentiert) eine Haut sei, um so mehr reflektiere sie das Licht, während die lichtgewöhnten Stellen am meisten Gesamtabsorption hätten. Das Reflexionsmaximum liege in 99,2% der Fälle im Rot und Orange. Bei Pigmentierten sei das feine Hautrelief erhöht und vermehrt (Oberfläche eines rauhen Körpers!), während bei Nichtpigmentierten das Relief verstrichener sei. Fettgehalt der Haut (Hornfett, besonders bei stark Pigmentierten!) erhöhe die Reflexion besonders im langwelligen Spektralteil; so habe künstlich eingefettete Haut beim Nichtpigmentierten 6 bis 16%, beim Pigmentierten bis 37% höhere Reflexion gegenüber der nichtgefetteten. Wie der Verf. angibt, fand auch Sonne, daß die menschliche Haut im sichtbaren und im unsichtbaren langwelligen Spektralteil 35% der insgesamt auffallenden Energie reflektiert. Aus den Untersuchungen Dornos, den der gleiche Verf. zitiert, gehe hervor, daß unpigmentierte Haut im Rot 80%, pigmentierte Haut etwa 65% reflektiere. Hardy und Muschenheim (7) geben für das Reflexionsvermögen der Haut für den Spektralbereich von 1 μ 20%, für 2 bis 7 μ nur mehr 5% an.

Die Streuung im Gewebe läßt sich durch Beugungsdispersion und „innere Reflexion" erklären. Bei der Beugung erfahren rote und i.r. Strahlen infolge ihrer größeren Wellenlänge die stärkste Ablenkung. Die Beugung kommt aber nur bei kleinsten Formelementen in Frage, d.h. solange die Dimension der beugenden Teilchen noch ansehnliche Vielfache der Wellenlänge beträgt, bleibt alles gebeugte Licht von merklicher Intensität in einem kleinen Winkelraum um die Richtung des direkten (ungebeugten) Strahls zusammengedrängt. Die parallel einfallenden Strahlen werden nach dem Huygensschen Prinzip an der Grenze der Strukturteilchen gebeugt. Das Gewebe würde dann gewissermaßen als Beugungsgitter wirken. Wenn man, wie einige Autoren, die Gewebe als „trübe Medien" betrachten würde, dann müßte man die Schwächung des durchtretenden Lichts vorwiegend der Beugung zuschreiben. An den Grenzflächen der zahlreichen Gewebsformelemente tritt, da diese mit der einfallenden Strahlung Winkel bilden, außerdem Reflexion ein. Innere Reflexion und Beugung führen also zu einer Zerstreuung und Schwächung des durchgehenden Lichts.

Über die Streuung im Gewebe sind im Schrifttum nur wenige Angaben zu finden, da sich die meisten Autoren nur mit der Durchdringung im allgemeinen Sinn beschäftigen. Plotnikow (8) fand den nach ihm benannten longitudinalen Streueffekt. Die Größe der Streuung sei eine Funktion

der molekularen Größe und der Struktur. Je größer das Molekel, bei um so größeren Wellenlängen liege das Maximum der Streuung. Bei Bestrahlung des Körpers dringe von der auftreffenden Strahlung am weitesten das I.R. mit 5 mm, die sichtbare Strahlung dagegen nur 2 bis 3 mm ein, während die u.v. Strahlen schon in 1 mm Tiefe vollständig verschwinden. In einer weiteren Arbeit zusammen mit Mibayashi (9) konnte bewiesen werden, daß eine Undurchlässigkeit der Körper für Licht nicht nur durch Reflexion oder Absorption, sondern auch durch starke Streuung verursacht werden kann. Außerdem wurde noch eine allgemeine Formel für die Verteilung der Streuung im Raum aufgestellt. Pauli und Ivančević (10, 11) fanden bei ihren Messungen, daß beim Durchtritt der Strahlung durch die Haut im Winkelgebiet von 45 bis 90° vom Durchfallslot noch rund 12,8% der Strahlenenergie der innerhalb des Winkelgebiets von 0 bis 45° gemessenen Energie liegen. Hardy und Muschenheim (12) untersuchen spektrometrisch die Durchlässigkeit der Haut. Von Strahlungen mit einer Wellenlänge von 1 μ werde $^1/_5$ der Energie durchgelassen. Bei einer Wellenlänge von mehr als 2 μ betrage die Durchlässigkeit 1% und weniger. Bei Ermittlung der Winkelverteilung der Streuung wird gefunden, daß bereits nach Durchdringung dünner Schichten ein beachtlicher Teil der Strahlung stark seitlich gestreut wird.

Die eigentliche Absorption hängt von der Natur der zu durchdringenden Medien ab. Eine Schwächung des durchgehenden Lichts tritt durch das Auftreten vieler dicht nebeneinanderliegender Absorptionsbanden, die auf Grund der zahlreichen im Gewebe vorhandenen organischen Verbindungen und Stoffwechselprodukte entstehen, ein.

In den meisten Arbeiten wird als „Absorption" einfach der Strahlungsverlust von Rot und I.R. beim Durchgang durch Gewebe, Organe, Blut und Stoffwechselprodukte bestimmt. Eine Scheidung von Reflexion, Streuung und Absorption ist sehr schwierig und außerdem für die zahlenmäßige Feststellung der Durchdringungsfähigkeit einer Strahlung von untergeordneter Bedeutung. Coblentz und seine Mitarbeiter (13) halten die Durchlässigkeit des Wassers für den wesentlichsten Faktor für die Eindringungstiefe von Strahlen in den menschlichen Körper. Schon eine Wasserschicht von 0,3 mm Dicke sei für alle Strahlen über 2,5 μ vollständig undurchlässig. Also könne auch Strahlung von Körpern, die sich auf einer Temperatur von 50 bis 100 und 100 bis 300° befinden, nur sehr geringe Eindringungstiefe erreichen. Eine größere Durchdringungskraft hätten nur die Wellenlängen von 0,4 bis 1,4 μ. Damit ist auf Grund physikalischer Untersuchungen bewiesen, daß die penetrierende Strahlung auf einen schmalen Wellenbereich beschränkt ist. Auch nach den Erfahrungen von Murrey und Levick (14) werde die Gesamtdurch-

dringung mitbestimmt durch die Absorption der Strahlen in Wasser. So ist die Absorption bei einer Wellenlänge von 0,65 μ über 8mal so stark als bei 0,55 μ; bei 0,779 μ beträgt sie fast das 110fache der Absorption bei 0,65 μ! Im I.R. steigt sie nur wenig an, so beträgt sie für 0,945 μ knapp das Doppelte der Absorption bei 0,779 μ. Die Absorption der Strahlen wird also über das Rot hinaus sehr ausgeprägt, so daß das Blut als „rot pigmentierter Wasserschirm" praktisch alle Strahlen bis auf die roten absorbieren würde. Zur Bestimmung der Absorption von I.R. im Blut geht auch Merkelbach (15) von der Durchlässigkeit des Wassers für I.R. aus. Chemische Veränderungen des Hämoglobins haben keine wesentlichen Einflüsse auf die Durchlässigkeit des Blutes. In späteren Untersuchungen über die Absorptionsspektren biologisch wichtiger, körpereigener Stoffe gibt der Autor für Hämoglobin, Hämin und Hämochromogen das Maximum der Absorption im I.R. bei 0,87 bis 0,95 μ an (16). Aus den I.R.-photographischen Studien von Fröhlich und Rodenacker (17) geht hervor, daß normales Blut I.R. absorbiert. Stärkere Absorptionsbanden im Rot und I.R. wechseln je nach der chemischen Beschaffenheit des Blutes. Quantitative Untersuchungen der Blutkörperchen und des Plasmas im I.R.-Absorptionsspektrum liefern Suhrmann und Breyer (18). Nach den Untersuchungen mit Kollath würde eine Blutkörperchenschicht in der Dicke eines Blutkörperchens im Sichtbaren bis 98% der durchfallenden Strahlung absorbieren, während im Rot eine Absorption kaum bemerkbar sei. Sie erreiche bei 0,7 μ im äußersten Rot den geringsten Wert (bei einer Schichtdicke von 1 Blutkörperchen 3‰ des auffallenden Lichts). Im I.R. zeige die Absorption deutlich den Einfluß des in den Blutkörperchen enthaltenen Wassers (71%). Außer den dem Wasser eigenen Absorptionsmaxima sei die Gesamtextinktion im kurzwelligen I.R. gering. Das Plasma zeige im Sichtbaren nur bis etwa 1 μ eine vom Wasser abweichende Extinktion, dann im wesentlichen die typischen Wasserbande (93,7% Wasser). Damit ist bewiesen, daß die Absorption des Blutes am geringsten im Rot ist und im I.R. in hohem Maße von der Absorption des Wassers bestimmt wird. Gigon (19) fand bei seinen Untersuchungen des Kohlehydratstoffwechsels im Blut mit I.R., daß eine Steigerung des Gesamtkohlenstoffs im Blut eine Vermehrung der Absorptionsfähigkeit des Blutes, eine Verminderung dagegen auch eine Abnahme der Absorptionsfähigkeit des Blutes für I.R.-Strahlen zur Folge hat. In einer zweiten Arbeit untersuchte Gigon (20) die Durchlässigkeit verschiedener Organstücke im I.R. Dabei ergab sich, daß normale menschliche Haut für I.R. leicht durchgängig ist, weniger die behaarte Haut. Am leichtesten für I.R. durchgängig sei Lungengewebe, relativ durchlässig Leber, Milz, Niere und Gehirn. Knochen absorbiere weniger I.R. als

Lunge oder Leber. Die Ursache für die verschiedene Durchlässigkeit der Organe für I.R. sei (neben der verschiedenen Blutfülle und den damit verbundenen Erscheinungen) ihre verschiedene physikalische Beschaffenheit (Plotnikow weist in seiner Arbeit darauf hin, daß die hier als Absorption gedeutete Undurchlässigkeit der Gewebe gegenüber den Strahlen auf Streuung beruhe).

Die Durchlässigkeit der Haut und der darauffolgenden Gewebsschichten wird in einer Reihe von Arbeiten behandelt. So ermitteln Pauli und Ivančević (s. 10 und 11) spektroskopisch die Durchlässigkeit der Haut für den Strahlungsbereich von 0,7 bis 1,2 μ. Nach den Untersuchungen steigt die Durchlässigkeit gegen den langwelligen Teil des Spektrums langsam an und erreicht bei der menschlichen Haut für eine Wellenlänge von 0,7 bis 0,76 μ mit 47,6% Durchlässigkeit das Maximum, um im kurzwelligen I.R. bereits wieder etwas abzunehmen. Die Untersuchungen am Kaninchenohr sollen nur geringe Unterschiede (4%) zwischen normal durchbluteter und nichtdurchbluteter (Leichen-) Haut ergeben haben, so daß die Verwendung von Leichenmaterial vertretbar wäre, was allerdings mit den Ergebnissen der vorher besprochenen Arbeiten über Absorption von Rot und I.R. im Blut in Widerspruch steht. In einer Arbeit über die Lichtdurchdringung von Bachem (21) wurden verschiedene Hautschichten von zunehmender Dicke mit Fett- und Muskelschichten untersucht. Dabei verhält sich die Transmission in allen Hautschichten fast gleich und nimmt gegen den langwelligen Teil des Spektrums hin zu. Das Maximum der Penetration liegt für die obersten Schichten (Stratum corneum und Malpighi), in denen die Absorption noch verhältnismäßig gering ist, im Wellenlängengebiet von 0,55 bis 0,75 μ und in der Subkutis, wo der größte Teil der eindringenden Strahlung absorbiert wird, bei etwa 0,75 μ. Gegen das kurzwellige I.R. nimmt die Absorption schon wieder langsam zu. Aus den Untersuchungen geht außerdem hervor, daß die im Penetrationsmaximum durch die Subkutis dringende Strahlenmenge nur sehr gering sein kann. Die Frage der Durchlässigkeit der menschlichen Haut im Wellenlängengebiet von 0,3 bis 2,0 μ wurde von Gaertner (22) eingehend bearbeitet. Die Untersuchungen gelten allerdings für Haut ohne Stratum corneum. Im Gebiet von 0,7 bis 1,5 μ sei die Durchlässigkeit am größten und nur wenig von der Wellenlänge abhängig. Nach Wellenlängen oberhalb 1,5 μ falle die Durchlässigkeit schneller ab als nach dem Violett zu.

In allen bisher besprochenen Arbeiten wurde der Ausdruck „Absorption" nur als Sammelbegriff für den Gesamtstrahlungsverlust bei der Gewebsdurchdringung und nicht als Ausdruck eigentlicher Absorption gebraucht. Dagegen untersuchten Hardy und Muschenheim (s. 12)

die Transmission der menschlichen Haut für I.R.-Strahlung im Meßbereich von 0,9 bis 12 μ gesondert unter Berücksichtigung der Streuung, so daß sich reine Durchlässigkeitskurven ergeben. So soll bei einer Wellenlänge von 1,2 μ, die von der I.R.-Strahlung noch am wenigsten absorbiert werde, die Absorption in 2 mm Tiefe bereits 95%, in 3 mm Tiefe sogar 99% betragen. Damit bestätigt sich, daß auch schon die kurzwellige I.R.-Strahlung verhältnismäßig oberflächlich absorbiert wird und keine besondere Penetrationskraft hat.

Die Ergebnisse aller bisher besprochenen Arbeiten lassen sich folgendermaßen zusammenfassen:

1. Reflexion. Die Angaben der verschiedenen Autoren über die Reflexion an der Hautoberfläche zeigen weitgehende Übereinstimmung. Die Reflexion sei am stärksten im Spektralbereich des Rot und I.R. Bezüglich der Hautbeschaffenheit treten gewisse Unterschiede auf, in denen vor allem die Rauhigkeit der Oberfläche, aber auch der Fettreichtum im Sinne einer Steigerung, die Pigmentierung im Sinne einer Verminderung der Reflexion wirken. Die Zahlenwerte für den Reflexionsverlust bewegen sich für Rot und I.R. um 40 bis 60%.

2. Streuung. Die Streuung wächst mit der Dicke der durchstrahlten Schicht und beeinflußt die Transmission wesentlich. An der Extinktion der Strahlung im Gewebe hat die Streuung einen außerordentlich großen, wahrscheinlich weit überwiegenden Anteil.

3. Absorption. Die eigentliche Absorption scheint im wesentlichen von der Absorption der Strahlung durch Blut und Gewebssäfte, damit aber auch weitgehend, wenigstens für I.R., von der des Wassers bestimmt zu sein.

Das größte Durchdringungsvermögen hat (nach ziemlich übereinstimmenden Angaben) die Strahlung von 0,6 bis 1,2 μ, äußerstenfalls bis 1,4 μ, also nur im Bereich des Rot und kurzwelligsten I.R. Das Maximum der Transmission wird etwas verschieden angegeben, von den einen Autoren zwischen 0,7 und 0,76 μ, von den anderen für den Bereich von 0,8 bis 1,0 μ. Nach beiden Seiten des Spektrums, sowohl gegen den langwelligen Teil wie gegen das U.V. zu, scheint die Durchlässigkeit rasch abzusinken.

Theoretische Überlegungen und experimentelle Untersuchungen ergeben den Schluß, daß die untersuchte Strahlung selbst im Bereich des Durchlässigkeitsmaximums nicht besonders tief in den Körper eindringen kann.

Einige wenige Autoren, wie Ostermann (23), Linger (24) und Lauscher (25, 26), behaupten im Gegensatz zu den sonst im Schrifttum

allgemein vertretenen Anschauungen über Strahlenpenetration, daß Rotlicht infolge seiner kürzeren Wellenlänge nur oberflächliche Hautschichten durchdringe, I.R. dagegen vermöge seiner größeren Wellenlänge auch größere Penetrationsfähigkeit habe. Allerdings befaßte sich nur Lauscher experimentell damit und will nachgewiesen haben, daß von einer Strahlung von 0,8 bis 1,5 μ Wellenlänge noch 5 bis 7% 2,5 cm Gewebsdicke (Hand) zu passieren vermochten.

Zum Beweis der Berechtigung für die therapeutische Verwendung roter und infraroter Strahlen bedient man sich häufig der Arbeiten von Mesernitzki und Heald, die unseres Wissens bisher als einzige die Durchdringung des lebenden menschlichen Körpers durch diese Strahlung nachzuweisen scheinen. Mesernitzki (27) suchte die Durchdringung des menschlichen Körpers durch Sonnenstrahlen, bzw. durch deren roten und infraroten Spektralteil nachzuweisen. Die Bestimmung durchdringender Strahlung sollte durch Kontaktmessungen der Hauttemperaturen an der der bestrahlten Körperpartie gegenüberliegenden Seite und durch Abbildung der roten und infraroten Strahlen nach Verlassen der Gewebe auf panchromatischen Platten geschehen. Zu den recht weitgehenden Schlüssen des Verf. über die Penetrationseigenschaften der Strahlen ist zu sagen, daß sie in krassem Gegensatz sowohl zu einer rein physikalischen Betrachtung als auch zu allen uns bisher bekannten Arbeiten (mit Ausnahme der erwähnten 3 Autoren, von denen aber nur Lauscher eine kurze experimentelle Begründung seiner Auffassung bringt) stehen. Die als Beweis für eine Strahlenpenetration angeführten photographischen Beobachtungen, die allerdings in der Arbeit nicht abgebildet werden, sind wohl sicher Streulichterscheinungen, wie sie auch Freund in seinen Streulichtuntersuchungen des menschlichen Körpers (28) beschreibt. Jedenfalls läßt sich auf Grund physikalischer Betrachtungen und bisheriger Erfahrungen bei Untersuchungen der Strahlenpenetration sagen, daß eine vollkommene Durchdringung des menschlichen Körpers, wie sie Mesernitzki angibt, äußerst unwahrscheinlich ist. Heald (29) benutzt die viel empfindlichere photoelektrische Methode (Empfindlichkeitsmaximum der Photozelle zwischen 0,7 und 0,9 μ). Der Verfasser kommt zu dem Schluß, daß die I.R.-Strahlen zwischen 0,7 und 0,9 μ Handgelenk und Vorderarm nachweisbar zu durchdringen vermögen, obwohl nur eine Lichtquelle verhältnismäßig geringer Intensität (100 W) und eine wenig empfindliche Apparatur zur Verfügung gestanden habe. Die hier verwendete Untersuchungsmethode ist die bei weitem genaueste und erfolgversprechendste, da sie noch außerordentlich geringe Strahlenmengen nachzuweisen gestattet. Diese Arbeit ist auch die einzige, wenigstens soweit wir in dem uns zugänglichen Schrifttum

feststellen konnten, die mit physikalisch einwandfreier Methode die Durchdringung menschlichen Gewebes in vivo nachweist. Eine quantitative Auswertung der Ergebnisse dieser Untersuchungen unternahm der Verfasser nicht.

Nachdem die bisher besprochenen Arbeiten interessante Aufklärungen über die Durchlässigkeit einzelner Gewebsschichten und Gewebsflüssigkeiten für Rot und I.R. gebracht haben und durch die Untersuchungen Healds auch der Nachweis der Durchdringungsfähigkeit roter und infraroter Strahlen durch dickere Schichten lebenden menschlichen Gewebes geliefert schien, sollten eigene Versuche einen Schritt weiter führen und

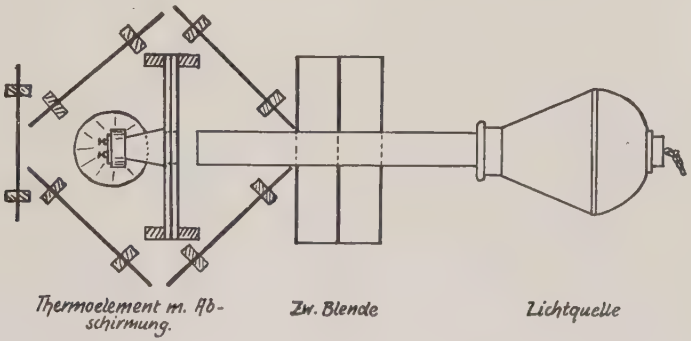

Bild 1

die Durchstrahlung lebenden menschlichen Gewebes in dickeren Schichten möglichst auch zahlenmäßig erfassen.

Da es sich gleichzeitig um eine Nachprüfung der früheren Versuche handeln sollte, wurden die Untersuchungen mit den 3 Methoden ausgeführt, die schon in den früheren Arbeiten angewandt worden waren:

Thermoelektrische, photographische und photoelektrische Methode

Bei Durchführung dieser einzelnen Untersuchungsmethoden galt es, von vornherein alle in Frage kommenden Fehlerquellen möglichst zu beseitigen.

Für die thermoelektrische Methode erschien uns dies besonders wichtig. Zur Messung stand eine Mollsche Thermosäule (80 Lötstellen, Constantan-Manganin) und zum Anzeigen des Ausschlags ein Zeißsches Schleifengalvanometer (hängende Bandschleife, Empfindlichkeit 1 Skalenteil = $3{,}7 \times 10^{-8}$ Amp.) zur Verfügung. Als Strahlenquelle wurde eine Solluxlampe (300 W) als Prototyp einer stark Rot und I.R. emittierenden Lampe gewählt. Das Thermoelement wurde zur Ausschaltung jeder Beeinflussung durch direkte oder indirekte Strahlung allseits sorgfältig eingepackt. Gegen störende Nebeneinflüsse wurde die Thermosäule mit Pappblenden, die sich infolge ihrer geringen Wärmeleitfähigkeit ausgezeichnet bewährten, umbaut. Gegen den Strahler zu wurde eine aus 3 luftisolierten Schichten bestehende Blende mit einer kreisförmigen Öffnung von der Größe des Auffangtrichters vor das Thermoelement gesetzt (s. Bild 1).

Die Entfernung zwischen Strahler und Thermosäule betrug nur 50 cm. Eine geringere Entfernung wurde vermieden, um nicht doch durch Sekundärstrahlung des erhitzten Lampengehäuses Fehlausschläge am Instrument zu bekommen. Außerdem wurde die Lampe bei den Versuchen nur kurz eingeschaltet und dann wieder bis zur Abkühlung gewartet. Zur Vermeidung von Streustrahlung war in die Austrittsöffnung der Solluxlampe eine Röhre eingesetzt, die bis knapp vor das Thermoelement reichte.

Die Versuche wurden angestellt:

1. Ohne Filter. Dadurch machte sich allerdings die Körperstrahlung durch langsames Ansteigen des Ausschlags im Instrument bemerkbar.

2. Unter Einsetzen von 1 bis 2 0,1 mm dicken Glasplättchen vor die Thermoelemente, wodurch die Körperstrahlung wesentlich (auf etwa $^1/_5$) gedämpft wurde.

3. Unter Vorsetzen einer 4 mm dicken Steinsalzscheibe, die bei einer Durchlässigkeit von 0,17 bis 18 μ die Körperstrahlung stark (auf etwa $^1/_{10}$) verminderte.

Verschloß man mit dem Handteller die Blendenöffnung vor dem Thermoelement, so erhielt man einen langsam ansteigenden Ausschlag um einige Teilstriche im Instrument. Dieser verringerte sich entsprechend, falls man eines der Filter einsetzte. Schaltete man die Strahlenquelle ein, nachdem die Schleife des Instruments zur Ruhe gekommen war, so konnte trotz längerer Brennzeit (1 Sek. bis 1 Min.) kein weiteres Ansteigen des Ausschlags mehr beobachtet werden. Dabei war es ganz gleichgültig, ob vor den Thermoelementen die Steinsalzscheibe oder das Glasplättchen eingesetzt war oder ob ohne Filter gearbeitet wurde. Auch bei vielfachen Wiederholungen, wobei wir die Mittelhand verschiedener Personen (mittlere Schichtdicke 26 bis 36 mm) zu durchstrahlen versuchten, ergab sich nie ein Effekt.

Es ist nach diesen Versuchen anzunehmen, daß mit der beschriebenen Methode eine Strahlenpenetration nicht nachweisbar ist, wenn auch Lauscher und Mesernitzki sie damit festgestellt haben wollen. Wenn überhaupt irgendwelche Strahlung durchdringt, dann muß die penetrierende Menge von einer Größenordnung sein, die diese Apparatur nicht mehr anzeigt. Das wäre bei der von uns verwendeten empfindlichen Versuchsanordnung der Fall, wenn die durchdringende Strahlung weniger als $0{,}2^0/_{00}$ der auftreffenden betragen würde.

Die Anwendung der photographischen Methode versprach von vornherein wenig Erfolg. Es handelte sich lediglich darum, die entsprechenden Schrifttumsangaben nachzuprüfen. Für die Untersuchungen wurde aus Zweckmäßigkeitsgründen wieder die Hand gewählt. Wegen der starken Streuung sollte die Schichtseite der Platte der Hand möglichst angenähert werden. Deshalb wurde für die Platten (Format 9×12 cm) eine besondere Kassette gebaut. Gegen den Strahler zu befand sich in der Kassette eine kreisförmige Öffnung (Durchmesser 60 mm) für den Strahlendurchgang. In diese war ein hochglanzpolierter Metallring lichtdicht eingelassen, der nach außen 10 mm vorstand und innen bis fast auf die Plattenschicht reichte. Gegen die Strahlenquelle zu wurde die Hand sorgfältig abgeschirmt und nur die den Filtern entsprechende Öffnung (35×35 mm) ausgespart. Die Filter selbst wurden über der zu untersuchenden Stelle lichtdicht in die Abschirmung eingesetzt. Durch das die Abdichtung erzielende tiefe Eindrücken des Rings in den Handteller war mit dem Hautabdruck eine genaue Kontrolle möglich, ob sich das Fenster für den Strahleneinfall mit der zur Aufnahme gelangenden Fläche deckte. Als Strahlenquelle fand wieder die Solluxlampe (300 W) Verwendung. Als Plattenmaterial wurden die Infrarotplatten der Agfa „750 hart", „850 hart" und „950" benutzt, dazu die

entsprechenden Agfa-I.R.-Filter Nr. 83, 84, 85 (Angaben über Sensibilisierungsbereich der Platten von Agfa und über die Durchlässigkeitsbereiche der Filter von Merkelbach (30). Die Belichtungszeit betrug bis zu 5 Min., der Lampenabstand 35 cm.

Bei den Vorversuchen ergab sich, daß auswertbare Ergebnisse wegen der entweder zwischen den Fingern bzw. an den Interdigitalfalten durchfallenden oder gestreuten Strahlung nicht erzielt werden konnten. Die in den nächsten Versuchsreihen mit strenger Ausblendung erhaltenen Platten weisen für alle Belichtungszeiten bis zu 5 Min. nur mehr feine Schleier innerhalb des „belichteten" Bezirks auf. Bei Belichtungszeiten von 1 und 2 Min. ist auf einigen Platten auch bei genauester Betrachtung kaum eine Spur von Schleier zu sehen. Allerdings gelang es trotz vieler Versuche nicht, eine Reihe wirklich absolut reiner Platten herzustellen. Die Schleier lassen sich nach genauer Untersuchung und Vergleich nach Form, Ausdehnung und Lokalisation nur als durch geringste Mengen tangentialer Streustrahlung bedingt erklären.

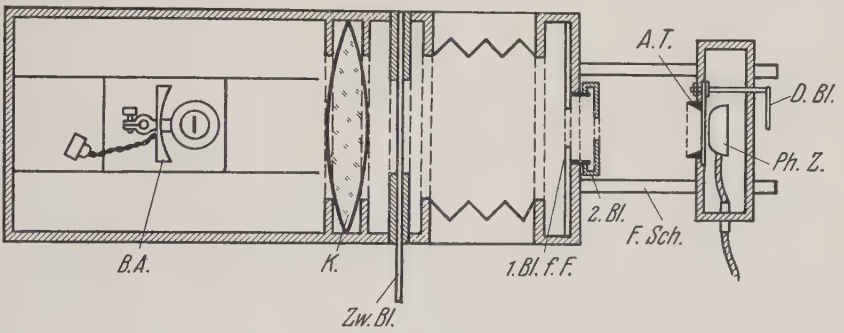

Bild 2

B.A. = Beleuchtungsapparat; K. = Kondensor; Zw.Bl. = Zwischenblende; 1.Bl.f.F. = 1. Blende zugleich als Filterfassung; 2. Bl. = 2. Blende (1,4 × 1,4); F.Sch. = Führungsschiene; Ph.Z. = Photozelle m. Gehäuse; A.T. = Auffangtrichter; D.Bl. = Hebel der Drehblende

Die bisherigen Ergebnisse, erhalten unter Beachtung und möglichster Ausschaltung aller Fehlerquellen mit einer wenn auch einfachen Apparatur, lassen doch erkennen, daß die Mesernitzkischen Photographien nicht durch Abbildung durchfallender Strahlen entstanden sein können, sondern daß sie wahrscheinlich auf gestreuter Randstrahlung beruhen, wie früher schon betont wurde.

Für den Nachweis der durchdringenden Strahlung kommt schließlich nur die photoelektrische Methode in Betracht.

Als Strahlenquelle wurde ein Projektionsapparat (500 W Osram-Kinolampe) verwendet (s. Bild 2). Das Objektiv an der Stirnwand des Apparats war entfernt und an seiner Stelle eine Vorrichtung zum Einschieben und Wechseln der Filter angebracht. Außen war eine Blende (14 × 14 mm) aufgesetzt, die allein das durch den Kondensor konzentrierte Lichtbündel durchließ. Der Strahlengang wurde so eingestellt, daß die kurze Strecke des konzentrierten Strahls mit beinahe parallelem Strahlengang ganz für die Versuche zur Verfügung stand. Um Fehlerquellen durch Ein- und Ausschalten der Lampe zu vermeiden, war nach dem Kondensor zur Unterbrechung des Strahlengangs eine Schieberblende angebracht. Für den Nachweis der durchdringenden Strahlung stand eine sehr empfindliche

Photozelle (Preßler Edelgas Spezial I, 6600×10^{-10} Amp/mLm) mit einstufigem Ververstärker (60 Megohm Gitterwiderstand, hohe Gitterisolation, Verstärkung etwa 200000-fach) zur Verfügung. Für besonders große Ausschläge, die am Milliamperemeter nicht mehr abzulesen waren, wurde eine Kompensationsschaltung in den Verstärker eingebaut. Für gewöhnlich wurden die groben Ausschläge am Milliamperemeter, die feinen mit Hilfe des Lichtzeigers eines Spiegelgalvanometers an einer vorher aufgestellten Eichskala abgelesen. Um etwaige Fehlergebnisse infolge Schwankungen der Lampenhelligkeit zu vermeiden, wurde die Netzspannung bei jedem Versuch an einem Voltmeter abgelesen. Die Photozelle war in ein lichtdichtes Kästchen eingebaut. Auf Isolierung und einwandfreie Abschirmung ihrer Zuleitungen war besonderer Wert gelegt worden. In das Kästchen war vor der Photozelle ein kurzer (16 mm) hochglanzpolierter Auffangtrichter eingelassen, dessen lichte Weite der lichtempfindlichen Schicht der Zelle entsprach. Seine innere Öffnung lag unmittelbar über der Photozelle und konnte mit einer Blende lichtdicht verschlossen werden. Das Photozellkästchen lief in 3 an der Stirnseite des Projektionsapparates angebrachten Führungsschienen und konnte durch Halterungen in der gewünschten Entfernung festgestellt werden. Da zu befürchten war, daß die Abdichtung zwischen dem Auffangtrichter vor der Photozelle und dem zu untersuchenden Körperteil nicht genügen würde, wurde der Auffangtrichter mit einem breiten Plastilinring umgeben, den man der Oberfläche des zu untersuchenden Teils gut anmodellieren konnte. Die der Strahlenquelle zugekehrte Seite der Hand oder des Unterarms wurde gegen diffuses Licht noch durch einen schwarzen Schirm abgedeckt, der nur ein kleines Fenster in Größe des zentrierten Lichtbündels (14×14 mm) besaß und auf der Haut festgeklebt wurde. Um ein Bewegen oder Verschieben der durchstrahlten Stelle während einer Versuchsreihe zu vermeiden, wurde der zu untersuchende Teil zwischen Stirnwand des Apparats und dem Photozellkästchen festgeklemmt. Zur Lokalisation des Strahlendurchgangs wurde nach jeder Versuchsreihe eine Röntgenaufnahme unter Kennzeichnung des Strahlenfeldes angefertigt. Die Ablesung der Meßwerte wurde in jedem Fall mehrmals wiederholt. Um ganz sicher zu gehen, daß nur die in dem ausgeblendeten Bezirk das Gewebe durchsetzende Strahlung auf die Photozelle gelangte, wurde bei jeder Messung in den Strahlenbereich unmittelbar an der Hautoberfläche ein Abdeckschieber angebracht. Dieser war so geformt, daß er eben die ausgeblendeten Hautstellen verdeckte, einer abweichenden oder auf unkontrollierbaren Umwegen in die Photozelle gelangenden Strahlung nicht im Wege stand. So oft dieser Versuch eine Falschstrahlung anzeigte, mußte die Abdichtung zwischen Hand und Photozelle überprüft und in Ordnung gebracht werden.

Um im Bereich des Rot und I.R. genauere Bestimmungen durch weitere Unterteilung des Spektralgebietes machen zu können, wurden diesmal 5 Filter (Lifa Nr. 396 und 430, Agfa I.R.-Filter Nr. 83, 84, 85) benutzt. Immerhin bleibt die spektrale Differenzierung, die mit einer Filtermethode erreicht werden kann, sehr grob. Ein Spektrograph hätte aber andererseits bei den verhältnismäßig dicken Schichten, auf deren Untersuchung es uns ankam, keine zur Messung ausreichende Intensität geliefert.

Um einen Überblick über die spektrale Verteilung der Gewebsdurchlässigkeit zu bekommen, mußten die bei den einzelnen Vorsatzfiltern erhaltenen Photostromwerte eingehend analysiert werden. Hierzu war es notwendig, alle diejenigen Faktoren, die außer der Gewebs-

schwächung eine spektrale Ungleichmäßigkeit bedingten, zu kennen und entsprechend rechnerisch zu eliminieren.

1. Die spektrale Emissionskurve der verwendeten Osram-Kinolampe (Wolframwendel 3080°). Diese wurde während der Versuchsserien mit gleichbleibender, ständig an einem Voltmeter abgelesener Spannung betrieben. Die Emissionskurve entnahmen wir einem uns von der Technologischen Dienststelle der Osram-A.G. zur Verfügung gestellten Schaubild.

2. Die Absorption des Kondensors. Diese wurde nach ungefährer Schätzung auf Grund der im Schrifttum enthaltenen Angaben über die I.R.-Absorption von optischen Gläsern eingesetzt.

3. Die Absorption der verwendeten Vorsatzfilter. Hier standen uns sehr genaue Spektraldiagramme zur Verfügung. Die Daten für die Agfa-I.R.-Filter Nr. 83, 84, 85 konnten wir einer Arbeit Merkelbachs (30) entnehmen. Für die Lifafilter Nr. 396 und 430 ließen wir Kurvenbilder von der Physikalisch-technischen Reichsanstalt herstellen.

4. Die spektrale Empfindlichkeitsverteilung der verwendeten Photozelle war aus einem von der Infram A.G. herausgegebenen Kurvenbild zu entnehmen.

Der Arbeitsgang zur Ermittlung der spektralen Unterschiede der Gewebsschwächung gestaltete sich im einzelnen so, daß zunächst die durchschnittlichen Ordinatenwerte für je 0,01 μ folgender Kurven miteinander multipliziert wurden:

Spektrale Intensitätsverteilung der Lampe.

Durchlässigkeitskurve des Kondensorglases.

Durchlässigkeitskurven der einzelnen Farbfilter.

Die erhaltenen Produkte geben als Verhältniszahlen die spektrale Intensitätsverteilung der nach Filterdurchgang noch vorhandenen Strahlung wieder.

Für jedes Filter wurden die zugehörigen Verhältniszahlen addiert; die Summen verhalten sich zueinander wie die durch die einzelnen Filter durchgelassenen Strahlenintensitäten. Dieses errechnete Verhältnis der Strahlungsintensitäten nach den einzelnen Filtern wurde zur Kontrolle und zur Korrektur verglichen mit dem Verhältnis der bei den einzelnen Filtern mittels eines Thermoelementes experimentell festgestellten Werte.

Für jeden einzelnen 0,01 μ-Wellenlängenabschnitt wurde das obengenannte Produkt nun noch mit dem zugehörigen Ordinatenwert der spektralen Empfindlichkeitskurve der Photozelle multipliziert.

Durch Addition in den einzelnen Filterbereichen wurden Verhältniszahlen für die bei den einzelnen Filtern zu erwartenden Photostromwerte errechnet. Diese Verhältniszahlen wurden zur Kontrolle verglichen mit experimentell erhaltenen Photostromwerten.

Relative Strahlenschwächungswerte des Gewebes für die einzelnen Spektralgebiete sind die Quotienten aus den errechneten bzw. zur Kontrolle experimentell bestimmten Photostromwerten vor der Gewebsdurchstrahlung und den Photostromwerten nach der Gewebsdurchstrahlung.

Um die Angaben über das spektrale Verhalten der Gewebsschwächung möglichst differenzieren zu können, sollen schmale Wellenlängengebiete herausgeschnitten werden.

Rechnet man die Differenz zwischen den Durchstrahlungswerten nach je zweien, in der Farbreihe aufeinanderfolgenden Filtern aus, so hat man in der Größe einer solchen Differenz ein Maß für die durchgestrahlte Intensität des unter Umständen sehr schmalen Wellenlängenbereiches, das den Unterschied zwischen den beiden betreffenden Filterabsorptionskurven ausmacht.

Zur übersichtlichen Darstellung der auf solche Art zustande kommenden Wellenlängenbereiche wurden die in einzelnen 0,01 μ-Abschnitten aus den Ordinaten der Filterdurchlässigkeitskurven errechneten Differenzwerte als Spektralkurve aufgetragen.

Bei diesen Spektralkurven wurde schließlich noch die spektrale Photozellenempfindlichkeit berücksichtigt, indem in den einzelnen 0,01 μ-Abschnitten die Ordinatenwerte mit den entsprechenden Ordinatenwerten der Photozellenempfindlichkeitskurve multipliziert wurden. Die damit erhaltenen Spektralkurven geben einen Anhalt dafür, aus welchen Wellenlängengebieten die angezeigten Strahlenintensitäten stammen.

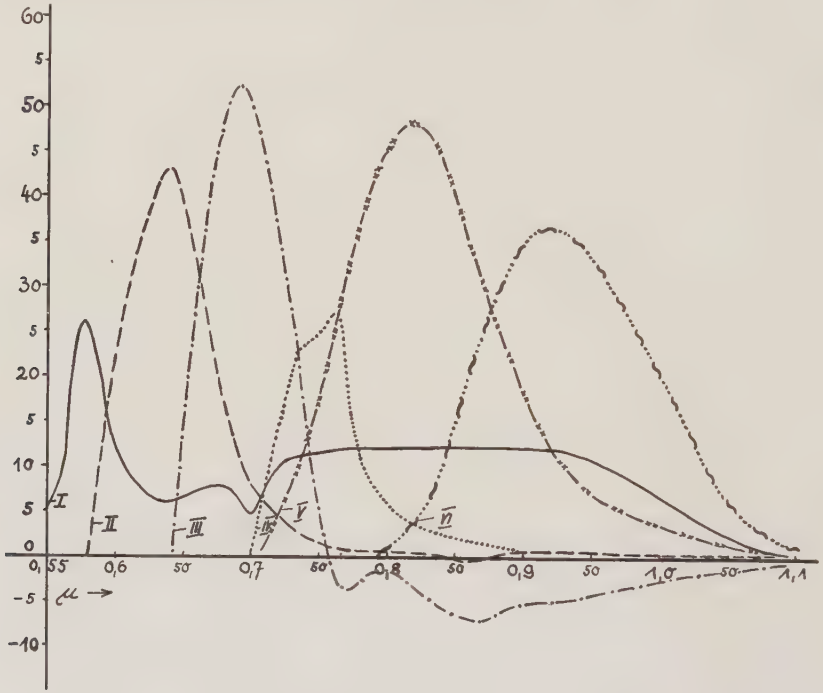

Bild 3

Die Meßergebnisse sind in Bild 3 und Tabelle I zusammengefaßt. In Bild 3 wurden mit I, II, III, IV, V, VI die einzelnen Spektralbezirke in Kurvenform aufgezeichnet. Auf diese beziehen sich die relativen Schwächungswerte der Tabelle I. Die Schwächung im Bereich IV (annähernd von 0,72 μ bis 0,80 μ) ist bei jeder Versuchsreihe gleich 10 gesetzt. Die in der Tabelle angegebenen Zahlen sind Mittelwerte der sich bei der rechnerischen Ermittlung ergebenden Zahlenspannen.

Die Auswertung ergibt für die einzelnen Spektralbezirke:

I. 50% der Kurvenfläche liegen im Gebiet der Kurven IV und V. Da in diesem Gebiet die Schwächung niedrig ist, muß in dem außerhalb, vor allem zwischen 0,55 und 0,70 μ liegenden Gebiet die Schwächung wesentlich höher sein als der — durchschnittliche — Wert von 20 bis 40, der für I gefunden wurde.

II. Verhältnismäßig engbegrenztes Gebiet von etwa 0,59 bis 0,70 μ. Für dieses Gebiet gilt also ein 5- bis 8mal höherer Schwächungsfaktor als für das Gebiet um 0,75 μ.

III. Die Kurve hat infolge einer Überschneidung der Filterabsorptionskurven einen „positiven" Anteil zwischen 0,66 und 0,75 μ und einen „negativen" Anteil zwischen 0,75 und 1,00 μ.

Berücksichtigt man, daß die „negative" Kurvenfläche und ein etwa ebenso großes Flächenstück zwischen 0,70 und 0,75 μ des „positiven" Anteils, in dem gut durchlässigen Gebiet von IV und V liegend, einander in ihrer Wirkung ungefähr aufheben, so darf man den gefundenen Schwächungsfaktor auf das Wellenlängengebiet von 0,65 bis 0,70 μ beziehen. Die Schwächung ist hier also 2- bis 3mal stärker als in dem darauffolgenden langwelligeren Gebiet und bildet also den Übergang zu dem hohen Schwächungsfaktor bei 0,59 bis 0,70 μ.

IV. Dieser Bezirk ist mit etwa 0,08 μ zwischen 0,72 und 0,80 μ der engste, der mit der Filtermethode abgegrenzt werden konnte. Da hier die Schwächung bei den meisten Versuchen am geringsten war, wurde der Wert für IV als Vergleichsmaßstab herangezogen und = 10 gesetzt.

Tabelle I

Verhältniszahlen der Absorptionswerte

Vers. Nr.	Schichtdicke in cm	Filterbereiche					
		I	II	III	IV	V	VI
1	2,4 (Hand)	45	70	12	10	27	40
3	2,9 (Hand)	25	57	17	10	12	50
5	3,2 (Hand)	35	70	30	10	10	40
6	3,65	43	66	47	10	13	43
7	3,7	14	45	5	10	30	150
8	3,7	10	50	23	10	7	25
9	4,3 (Arm)	30	80	23	10	7	25
11	5,3 (Arm)	17	50	90	10	4	17

V. Es handelt sich hier um ein verhältnismäßig weites Spektralgebiet zwischen etwa 0,75 und 0,90 μ. Der Schwächungswert ist im Durchschnitt gleich dem von IV. In den Versuchen 7 bis 11 ist der Faktor für V etwas kleiner als für IV. Ob diese Erscheinung mit der steigenden Gewebsdicke zusammenhängt, kann wegen der geringen Zahl der Versuche nicht mit Sicherheit angegeben werden.

VI. In diesem Gebiet zwischen 0,85 und 1,05 μ steigt der durchschnittliche Schwächungswert wieder auf das Mehrfache gegenüber dem vorhergehenden kurzwelligeren Gebiet an.

Trotz der Verwendung der Filtermethode, die eine sehr grobe spektrale Unterteilung bedingt, ergibt sich mit genügender Deutlichkeit, daß bei etwa 0,7 bis 0,8 μ ein Maximum der Durchlässigkeit der Hand bzw. des Unterarms der untersuchten Versuchspersonen liegt. Gegen 0,9 μ zu sinkt die Durchlässigkeit langsamer ab als gegen 0,6 μ. Die Unterschiede, die sich bei den einzelnen Versuchspersonen ergaben, sind vorwiegend graduell und bei einem Teil der Versuchspersonen durch verschiedene äußere und „innere" Reflexion, Pigmentierung, Hautbeschaffenheit

und Kapillardichte zu erklären. Jedoch ist die Zahl der Versuche zu klein, um genauere Angaben von diesen Faktoren machen zu können.

Für das Gebiet des von uns gefundenen Durchlässigkeitsmaximums wird auch im Schrifttum übereinstimmend eine gute Durchlässigkeit des Gewebes bzw. des Blutes angegeben. Von mehreren Autoren wird allerdings eine größere Durchlässigkeit bis 1,5 μ gefunden. Suhrmann und Breyer (s. 18) geben für den Blutkörperchenbrei eine ziemlich genaue Analyse der spektralen Durchlässigkeit vom UV.

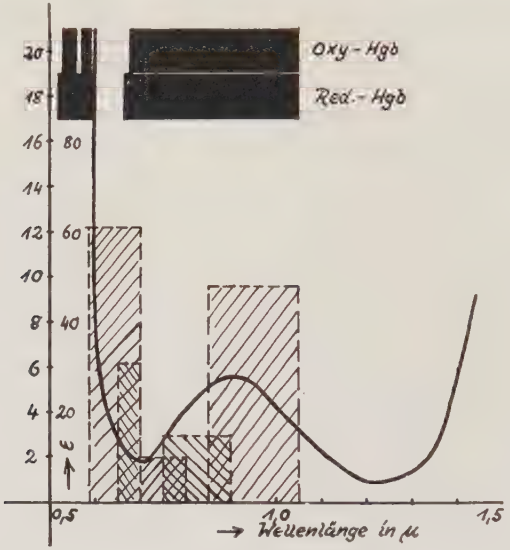

Bild 4

bis ins langwellige I.R. Sie finden ein Minimum der Absorption bei etwa 0,68 bis 0,75 μ (Bild 4, durchgezeichnete Kurve). Damit würden unsere Ergebnisse (Bild 4, schraffierte Säulen) gut übereinstimmen. Die in der Arbeit von Suhrmann und Breyer bei 1,10 bis 1,35 μ und von 1,60 bis 1,85 μ angegebenen weiteren Minima scheinen uns von großer Bedeutung zu sein. Bei unseren Untersuchungen mit der photoelektrischen Methode konnten wir diese Gebiete natürlich nicht mehr erfassen. Auffallend ist die mangelnde Übereinstimmung der gefundenen Absorptionswerte mit dem Spektrum des Blutfarbstoffs. Die Absorption sowohl von Oxyhämoglobin wie von reduziertem Hämoglobin reicht bis etwa 0,68 μ, also in das Gebiet der größten Gewebsdurchlässigkeit hinein. (In der Kurve sind die Spektren des Hämoglobins mit eingezeichnet.) Auch diese Tatsache scheint uns wieder darauf hinzuweisen, daß nicht die reine Absorption, sondern wahrscheinlich die Streuung für die Durchlässigkeit des Gewebes maßgebend ist.

Eine Feststellung der Größenordnung der Gewebsschwächung ließ sich nicht auf die einfache Weise erzielen, daß man die Photoströme vor und nach dem Einbringen des Untersuchungsobjekts in den Strahlengang verglichen hätte. Denn die Belastung der Photozelle mit der direkten Strahlung mußte vermieden werden. Zu einer guten Schätzung der Abschwächung der Strahlung gelangten wir dadurch, daß wir mit einer feinen Blende das Strahlenbündel bis zur Erzielung des gleichen Galvanometerausschlags wie bei der Gewebsdurchstrahlung einengten. Wir verwendeten dazu mit schwarzem Zaponlack überzogene Deckgläschen, in die feine Spalte eingeritzt waren. Durch Errechnung des Verhältnisses zwischen der Fläche des Strahleneinfalls bei der Gewebsdurchstrahlung und der (mikrophotographisch ausgemessenen) Fläche der Spaltblende ergab sich die Größenordnung der Strahlenschwächung zu etwa 1:500000.

Genauere Werte erzielten wir dadurch, daß wir die absoluten Beträge sowohl der einfallenden als auch der austretenden Strahlung gesondert ermittelten.

Arbeitsgang zur quantitativen Ermittlung der Einfallsstrahlung: Der sichtbare Anteil der direkten Strahlung wurde mittels eines Graukeilphotometers bestimmt[1].

Die obengenannten Verhältniszahlen wurden mit den spektralen Helligkeitsempfindungsfaktoren multipliziert und durch 1,51 dividiert. Aus der Abgleichung der Summe dieser Werte mit dem erhaltenen Photometerwert ergibt sich ein Proportionalitätsfaktor, der alle Verhältniszahlen in erg $sec^{-1}cm^{-2}$ bzw. Watt cm^{-2}-Werte überzuführen erlaubt. Mit Hilfe dieses Proportionalitätsfaktors wurde die Gesamtstrahlung und die Strahlung nach Durchgang durch die einzelnen Farbfilter bei Berücksichtigung des verwendeten Querschnitts des Strahlenbündels im Leistungsmaß ausgedrückt. Zur Kontrolle wurde eine direkte kalorimetrische Bestimmung der Strahlungsleistung vorgenommen. Die Strahlung fiel dabei in eine mit 90 g Wasser gefüllte, gegen Abstrahlung und Ableitung geschützt aufgestellte Küvette und wurde hierin an einem berußten Stanniolschirm aufgefangen. Die Kalorimeteranordnung wurde thermoelektrisch auf Wärmeverluste geprüft.

Die Austrittsstrahlung errechnete sich aus den mit dem Röhrengalvanometer bestimmten Photostromwerten und den Eichdaten der Photozelle. Die Berechnung erfolgte getrennt in einzelnen 0,01 μ-Abschnitten, um die spektralen Ungleichmäßigkeiten der verwendeten Strahlung und der Photozellenempfindlichkeit möglichst genau berücksichtigen zu können.

Aus naheliegenden Gründen seien nur die Werte angeführt, die sich auf den Wellenlängenbereich der größten Durchlässigkeit beziehen (Differenzwerte der Filter 83 und 84). Hier betrug die eingestrahlte Energie etwa 0,125 Watt. Die Werte der Austrittsstrahlung gehen aus Tabelle II hervor:

[1] Für die bereitwillige Vornahme dieser Messung sei der Leitung des Kamerawerks München der Agfa unser Dank ausgesprochen.

Tabelle II

Versuch Nr.	1	3	4	5	6	7	8	9	11
Schichtdicke cm	2,4	2,9	3,18	3,2	3,65	3,7	3,7	4,3	5,3
Austrittsstrahlung in Watt	1,6 $\times 10^{-6}$	$\sim 1 \times 10^{-7}$	$\sim 1{,}5 \times 10^{-7}$	$\sim 2 \times 10^{-7}$	$\sim 1{,}5 \times 10^{-7}$	$\sim 1 \times 10^{-7}$	$\sim 1 \times 10^{-7}$	$\sim 1 \times 10^{-7}$	$\sim 5 \times 10^{-8}$

Die Schwächungen betragen also durchschnittlich für eine Schichtdicke von 2,5 bis 3 cm das 100 000fache bis 1 000 000-fache. Im einzelnen zeigen die verschiedenen Versuchspersonen starke Unterschiede der auf die gleiche Schichtdicke reduzierten Schwächung. Die Abnahme der Schwächung mit steigender Schichtdicke ist auffallend gering. Da es sich um eine nahezu monochromatische Strahlung handelt, würde man ein Steigen der Absorption im Sinne einer e-Funktion erwarten. In Bild 5 ist in der Kurve I der Wert der einfallenden Strahlung (abzüglich der Oberflächenreflexion) mit dem mit großer Genauigkeit feststellbaren Wert der Austrittsstrahlung der Versuchsperson 1 (2,4 cm Schichtdicke) durch eine Gerade (e-Funktion) verbunden. Man sieht deutlich, daß die Werte für die dickeren Schichten mit zunehmender Schichtdicke höher liegen als die Fortsetzung der gezeichneten e-Funktion. Die Abweichungen, die weit außerhalb der Fehlergrenzen der Methode liegen, könnte man sich durch folgende Annahme erklären: Für die Schwächung der Strahlung ist eine Reflexion an den Grenzen der einzelnen Gewebsschichten (Stratum corneum — Stratum germinativum — Korium — Subkutis — Faszien — Muskelschichten — Knochen) sowie an gewissen Strukturelementen, wie Fettträubchen, Muskelfaserbündel, Gefäße usw., maßgebend. Da wohl auch für die letztgenannten Elemente anzunehmen ist, daß mit steigender Gewebsdicke weniger ihre Zahl als ihre Größe zunimmt, wäre also bei den verschieden dicken Versuchsobjekten mit einer weitgehend gleichbleibenden Anzahl von reflektierenden Grenzflächen zu rechnen. Wenn somit ein gewisser Teil der Strahlenschwächung dem progressiven Einfluß der Gewebsdicke nicht unterliegt, kann er bei Aufstellung der Schwächungskurve von vornherein von der Einfallsstrahlung abgezogen werden. Die Größe dieses Abzuges kann man nun — die Richtigkeit der genannten Überlegung vorausgesetzt — dadurch erhalten, daß man eine Gerade durch die Schar der vorhandenen Meßpunkte legt und den Schnittpunkt mit der Ordinate ermittelt (Kurve II). Hierbei kommt man zu der Größenordnung von 10^{-3}.

Ein solchermaßen hypothetisch abgeleiteter „Grenzschichtverlust" wäre natürlich als „innere Reflexion" unter die Streuverluste einzuordnen. Nach den vorliegenden Zahlen müßte man damit rechnen, daß etwa die

Hälfte des gesamten Verlustexponenten auf die Streuung an den genannten (groben) Strukturteilen zu beziehen ist. Bei der anderen Hälfte dürfte mit Wahrscheinlichkeit die übrige Streuung an den nicht

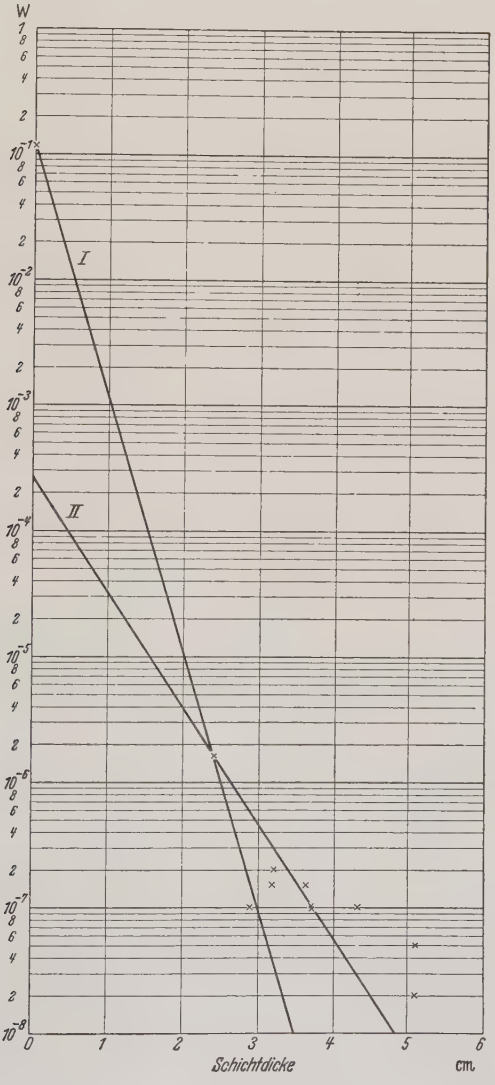

Bild 5

zahlenmäßig konstanten (feineren) Strukturteilchen am meisten beteiligt sein; der eigentlichen „Absorption" verbleibt wohl nur ein ganz geringer Einfluß.

Bei den Messungen selbst fiel noch eine erwähnenswerte Erscheinung auf. Während der Durchstrahlung der Mittelhand und der Handwurzel traten rhythmische Schwankungen im Ausschlag am Milliamperemeter auf, die eine Amplitude von 10% des Gesamtausschlags erreichten. Es zeigte sich, daß diese Schwankungen synchron mit der Radialispulsation verliefen. Wie diese Erscheinung zustande kommt, ob hier allein die Volumenänderung oder eine Änderung der Gewebsstruktur hinsichtlich des Gefäßnetzes maßgebend war, oder ob ein Einfluß des Blutchemismus vorliegt, sei dahingestellt. Jedenfalls liegen diese Erscheinungen außerhalb der Fehlergrenze der Apparatur. Außerdem ist noch zu bemerken, daß nach längerer Bestrahlung einer Strahlendurchgangsstelle die Absorption langsam, aber doch wesentlich (bis zu 20%) anstieg. Deshalb wurde immer nach etwa 5 Sek. Bestrahlung abgelesen. Die Erscheinung beruht wahrscheinlich auf erhöhter Absorption infolge vermehrter Blutfülle. Diese tritt nach starker lokaler Wärmeeinwirkung, nach Cramer (31) aber besonders durch Tiefenwirkung roter Strahlen ein.

Den roten und i.r. Strahlen wurde häufig eine ausgeprägte „Tiefenwirkung" zugeschrieben. Will man darunter das Eindringen einer thermisch wirksamen Flächenleistung durch die Haut und beträchtliche Fettschichten in Muskel- und Organregionen, Gelenkhöhlen usw. verstehen, so scheinen diesen Anschauungen die Tatsachen, alle physikalischen Überlegungen und die praktischen Versuchsergebnisse zu widersprechen. Denkt man jedoch an eine spezifische Strahlenwirkung und hält man bereits minimale Leistungsdosen in dieser Beziehung für ausreichend, so zeigen gerade die hier beschriebenen Untersuchungen, daß die in tiefe Gewebsschichten eindringende Strahlung immer noch einen physikalisch nachweisbaren Betrag bildet. Als dritte Möglichkeit für die Erklärung der therapeutischen Wirkung bleibt natürlich die Annahme einer bloßen Oberflächenreizwirkung und die Fortleitung der oberflächlich absorbierten Strahlungswärme.

Es muß bei der therapeutischen Anordnung das Bestreben naheliegen, eine möglichst große Leistungsdosis an den Krankheitsherd zu bringen. Überprüft man nach dieser Zielsetzung die bisher empfohlenen Bestrahlungsmethoden, so können Untersuchungen wie die hier beschriebene brauchbare Hinweise geben. Dies gilt zunächst hinsichtlich der zu verwendenden Strahlenart.

Nach ziemlich übereinstimmenden Angaben im Schrifttum und auch nach unseren Versuchsergebnissen liegt ein wichtiges Durchlässigkeitsmaximum bei 0,70 bis 0,80 μ. Vor und nach diesem Maximum sinkt die

Durchlässigkeit stark ab. Nach den Untersuchungen von Suhrmann und Breyer an Blutkörperchenbrei (s. 18) scheint ein weiteres günstiges Durchlässigkeitsgebiet zwischen 1,10 und 1,35 μ zu liegen. Die Verwendung des Neon-Glimmlichts (Maximum bis 0,65 μ reichend) kann nicht als Tiefenbestrahlung gewertet werden. Bei den Strahlern niedriger Temperatur ist eine größere Eindringungstiefe ihrer Strahlung schon wegen der Wasserabsorption des Gewebes von vornherein unwahrscheinlich.

Was die Frage der Dosierung anbelangt, ist es erwünscht, die Einengung des Spektralbereichs dahingehend auszunutzen, daß man die Flächenleistung der einfallenden Strahlung ohne wesentliche Temperaturempfindung gegenüber einer Mischstrahlung erhöht. Damit wird trotz beträchtlicher Schwächung des noch am besten durchdringenden Strahlenbereichs eine Tiefendosis zu erreichen sein, von der eine spezifische und, soweit subkutane Gewebe in Frage kommen, auch eine thermische Wirkung zwanglos vorstellbar ist. Die meisten der auf dem Markt befindlichen Strahler kommen diesen Forderungen weder nach der Einengung des Wellenlängenbereiches noch nach der verfügbaren Leistung nach. Soweit wir die Konstruktionen überblicken, scheint der von Witte angegebene Strahler (32) diesen Bedingungen am nächsten zu kommen.

Zusammenfassung

Im Hinblick auf die praktische Bedeutung der therapeutischen Bestrahlung mit Rotlicht und Infrarot beschäftigt sich vorliegende Arbeit mit der Frage der Eindringungstiefe dieser Strahlen.

Es wird über eigene Untersuchungen berichtet, die als Nachprüfung und in Ergänzung der Angaben des Schrifttums vorgenommen wurden.

Die Ergebnisse seien folgendermaßen zusammengefaßt:

1. Die spektrale Durchlässigkeitsverteilung, die mit der Filtermethode an der Mittelhand und am Unterarm photoelektrisch untersucht wurde, weist ein Maximum bei etwa 0,7 bis 0,8 μ auf. Sowohl nach der kurzwelligen wie nach der langwelligen Seite des Spektrums sinkt die Durchlässigkeit stark ab.

Das Gebiet nach verschiedenen Schrifttumsangaben zu erwartender weiterer Maxima über einer Wellenlänge von 1,2 μ konnte aus methodischen Gründen in die photoelektrischen Untersuchungen nicht einbezogen werden.

2. Die Größenordnung der Gewebsdurchlässigkeit für die (monochromatische) Strahlung im Durchlässigkeitsmaximum beträgt bei der Durchstrahlung der Mittelhand 1- bis 2mal 10^{-6}, beim Unterarm etwa 10^{-7}.

Die thermoelektrische und photographische Methode sind zum Nachweis dieser geringen Durchgangsstrahlung ungeeignet. Entgegenstehende Angaben dürften sich aus der Nichtbeachtung methodischer Fehlerquellen erklären.

3. An der Schwächung der Durchgangsstrahlung ist der Teil des Streuverlustes maßgebend beteiligt, der als Grenzflächenreflexion an den (bei allen Versuchspersonen mehr oder weniger zahlkonstanten) Gewebsschichten und gewissen (gröberen) Strukturelementen aufgefaßt wird. Die Strahlenschwächung nimmt dementsprechend bei steigender Dicke der durchstrahlten Versuchsobjekte (Hände und Unterarme verschiedener Versuchspersonen) nicht im Sinne einer e-Funktion zu.

4. Die Durchlässigkeit zeigt deutlich rhythmische, mit dem arteriellen Puls synchrone Schwankungen. Die Durchlässigkeit nimmt nach längerer Bestrahlung ab.

Es wird am Schluß der Arbeit auf die praktische Anwendung der gewonnenen Vorstellungen über die Gewebsdurchstrahlung, insbesondere bezüglich der Bestrahlungsmethoden, hingewiesen.

Schrifttum

1. R. Wellenstein, Diffuse Reflexion rauher Oberflächen im Ultrarot. Strahlenther. 54 (1935): 329. — 2. W. Kartschagin, Über den Einfluß des Pigments auf die Menge der von der Haut reflektierten infraroten Strahlen. Phys. Ther. 1928: 24. — 3. T. Yamada, Biological researches on the Infra-Red Rays. IV. Reflection of the Infra-Red Rays by the human skin in situ. Acta Scholae med. Kyoto 17 (1934): 117—119. / Biologische Untersuchungen über die infraroten Strahlen. IV. Reflexion von infraroten Strahlen. Ref. Zbl. Radiol. 1935: 470. — 4. T. Yamada, Biological researches on the Infra-Red Rays. II. Resorption of the Infra-Red Rays by rabbit's ears. Acta Scholae med. Kyoto 15 (1933): 355-357. / Biologische Untersuchungen über die infraroten Strahlen. II. Absorption infraroter Strahlen durch Kaninchenohren. Ref. Zbl. Radiol. 1933: 485. — 5. A. Gigon, Biologische Lichtwirkungen. Klin. Wschr. 1930, II: 1947. — 6. W. Schultze, Über die Reflexion und Absorption der Haut im sichtbaren Spektrum. Strahlenther. 22 (1926): 38). — 7. J. E. Hardy und C. Muschenheim, J. clin. Invest. 1934, 13: 817. Ref. Zbl. Radiol. 19 (1935): 671. — 8. J. Plotnikow, Über die Strahlung des Lichts in den organischen Körpern. Strahlenther. 39 (1931): 469. — 9. J. Plotnikow und Mibayashi, Ausmessung der Ausbreitung der Wärmestrahlen in verschiedenen Tierkörperleichen nach der photographischen Methode. Strahlenther. 40 (1931): 546. — 10. W. E. Pauli und I. Ivančević, Untersuchungen über das Absorptionsvermögen der Haut im langwelligen Gebiet des Spektrums. Strahlenther. 25 (1927): 532. — 11. W. E. Pauli und I. Ivančević, Über die Penetration des roten und ultravioletten Lichts. Med. pregl. 1927: 61—63. — 12. I. D. Hardy und C. Muschenheim, Radiation of heat from the human body. V. The transmission of infrared radiation through skin. J. clin. Invest. 15 (1936): 1—9. — 13. W. W. Coblentz, M. J. Dorcas und C. W. Hughes, Strahlungsmessung des elektrischen Lichtbogens und anderer therapeutischer Lichtquellen. Strahlenther. 30 (1928): 170. — 14. C. Murrey und Levick,

The therapeutic value of Red Rays. Arch. Radiol. Electrother. 31 (1926), 310: 185—189. / Über den therapeutischen Wert roter Strahlen. Ref. Strahlenther. 25 (1927), 4: 735—739. 15. — O. Merkelbach, Absorption von infraroten Strahlen im Blut. Ref. Zbl. Radiol. 22 (1936): 699. — 16. O. Merkelbach, Die biologische Bedeutung infraroter Strahlen. 1937. — 17. Fröhlich und Rodenacker, Infrarotphotographische Studien am Blut. Zbl. Radiol. 22 (1936): 175. — 18. Suhrmann und Breyer, Quantitative Untersuchungen im ultraroten Absorptionsspektrum der Blutkörperchen und des Plasmas. Strahlenther. 40 (1931): 772. — 19. A. Gigon, Licht und Kohlehydratstoffwechsel. Z. exper. Med. 71 (1930), 3, 4: 525. — 20. A. Gigon, Organdifferenzierung mit Infrarotstrahlen. (Verh. dtsch. Ges. inn. Med. 160—167.) Zbl. Radiol. 7: 847. — 21. A. Bachem, Lichtdurchdringung der menschlichen Haut. Strahlenther. 39 (1931): 30. — 22. O. Gaertner, Die Durchlässigkeit der menschlichen Haut im Gebiet von 0,3—2,0 μ. Strahlenther. 40 (1931): 377. — 23. Ostermann, Praktikum der physikalisch-diätetischen Therapie. Wien 1934, II. Aufl. Ultrarot. Wien. med. Wschr. 1933, 33. — 24. A. Linger, Strahlentherapie mittels der Diamixstrahlenlampe. Wien. med. Wschr. 1933, 33. — 25. F. Lauscher, Der Doppelreflektor, ein Fortschritt in den Hilfsmitteln der Wärmestrahlentherapie. Strahlenther. 47 (1933): 396. — 26. F. Lauscher, Ergebnisse der Untersuchungen der Diamixstrahlenlampe. Sonderdruck der Firma. — 27. G. P. Mesernitzki, Zur Frage der Durchdringungsfähigkeit des menschlichen Organismus für Sonnenstrahlen. Z. phys. Ther. 37 (1929): 92. — 28. Freund, Streulichtuntersuchungen des menschlichen Körpers. Radiolog. 2, 3—4: 100. — 29. C. B. Heald, The permeability of the body to Infra-Red Rays. Brit. med. J. 1933, II: 54—45. — 30. O. Merkelbach, Strahlenfilter für das infrarote und rote Spektralgebiet. Strahlenther. 57 (1936): 57. — 31. H. Cramer und G. Fechner, Klinische Erfahrungen mit Intensivbestrahlungen an Hand des Hämogramms. Strahlenther. 33 (1929): 186. / Hautuntersuchungen und klinische Ergebnisse bei Anwendung von sichtbarem kalten Rotlicht. Strahlenther. 39 (1931): 474. — 32. E. Witte, Über qualitative und quantitative Unterschiede in den Strahlungen von Natursonne und therapeutisch benutztem Kunstlicht sowie über eine neue Lampe zur künstlichen Herstellung praktisch sonnengleichen Lichts. Strahlenther. 58 (1937), 1: 113.

Lebenslauf

Am 10. August 1913 als Sohn des Professors Georg Hofmann geboren, besuchte ich die Volksschule, um nach 4 Klassen an das Alte Realgymnasium in München überzutreten. Nach 9klassigem Besuch legte ich dort im März 1932 die Reifeprüfung ab, auf Grund deren ich im Sommer-Semester 1932 mit dem Studium der Medizin begann. Nach 5 Semestern habe ich im Juli 1934 die ärztliche Vorprüfung an der Universität München abgelegt. Meine klinischen Semester verbrachte ich ebenfalls an der Universität München, wo ich auch im Herbst 1937 das medizinische Staatsexamen ablegte. Im Medizinalpraktikantenjahr war ich 9 Monate intern und 3 Monate chirurgisch tätig. Am 20. Dezember 1938 erhielt ich die Bestallung als Arzt.